

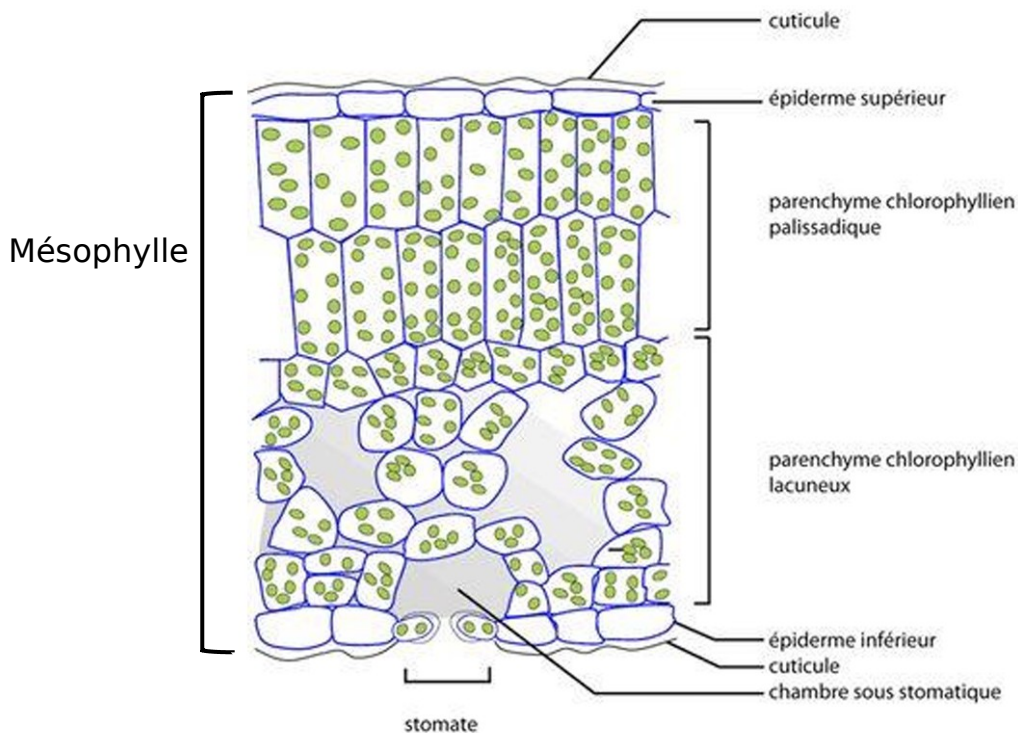
Stomates

Un stomate fait **15-25 μm de largeur** et **30-50 μm de hauteur**.

La densité stomatique d'une feuille peut dépasser **20 000 stomates par cm^2** .

Cela dépend de facteurs génétiques et environnementaux.

Localisation des stomates dans une feuille



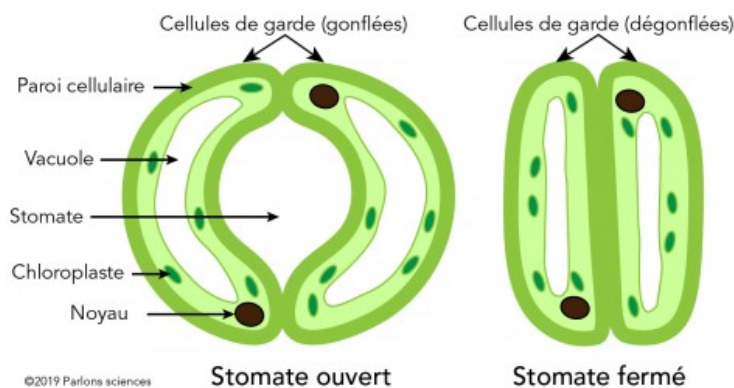
Structure

Les **stomates** sont des **pores situés dans l'épiderme des feuilles et des tiges**.

Ils sont formés de **2 cellules stomatiques ou de garde**.

Quand le stomate est **ouvert**, les cellules stomatiques se **gonflent** ;

quand il est **fermé**, les cellules stomatiques sont **flasques**.



Fonctions et particularités

1. Échanges gazeux O_2/CO_2

Les **stomates** laissent entrer du **CO_2** venant de l'air ambiant et laissent sortir du **O_2** créé par les cellules photosynthétiques venant du **mésophylle**.

2. Aspiration foliaire

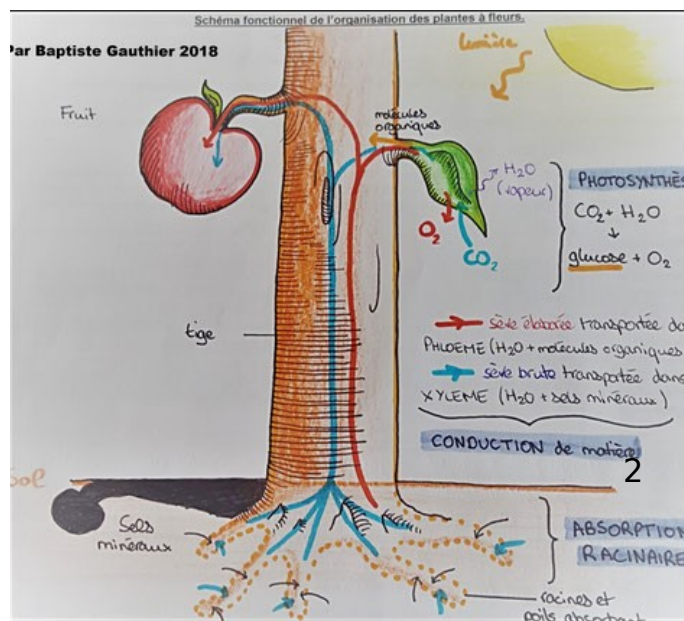
L'eau s'**évapore** des feuilles (**transpiration**). Cela entraîne une **aspiration** (force de traction) car les cellules qui ont perdu de l'eau vont être **remplies** pour combler ce vide.

La **sève brute** (eau + minéraux) est tirée depuis les cellules voisines (situées dans les racines).

La sève brute remonte dans les vaisseaux du **xylème** pour nourrir la plante en eau et minéraux.

Dans les feuilles se déroule la **photosynthèse**.

Les feuilles fabriquent des **sucres** à partir des rayons UV, de l'eau et du CO_2 .



La **sève élaborée** est composée d'eau et de sucres, surtout du **saccharose** créé par la photosynthèse.
Cette sève élaborée est transportée dans les vaisseaux du **phloème** pour distribuer l'énergie à toute la plante.

3. Eau perdue

90% de l'eau perdue par une plante s'échappe par les **stomates**

4. Localisation des stomates

Ils sont souvent situés à la **face inférieure** de la feuille pour éviter des pertes d'eau :

- La face inférieure reçoit moins de **rayons UV**, ce qui empêche un surplus d'évaporation.
- Il y a moins de **vent direct**, ce qui limite l'évaporation.

5. Eau évacuée pour fixer 1g de CO₂

Fixer 1 g de CO₂, c'est quand la plante capte 1 g de dioxyde de carbone de l'air pour le transformer en **sucres** par la **photosynthèse**.

Pendant ce processus, elle **perd de l'eau** par les **stomates**.

Les plantes **C4** (comme le maïs) sont plus efficaces : elles perdent **moins d'eau** (300g au lieu de 600g) pour fixer la même quantité de CO₂.

6. Refroidir la plante

L'**évaporation** fait refroidir la plante de **10 à 15 degrés** de moins que la température ambiante.

7. Plante du désert

Ces plantes du désert, type **CAM**, emmagasinent du **CO₂** la nuit lorsque leurs **stomates s'ouvrent**.

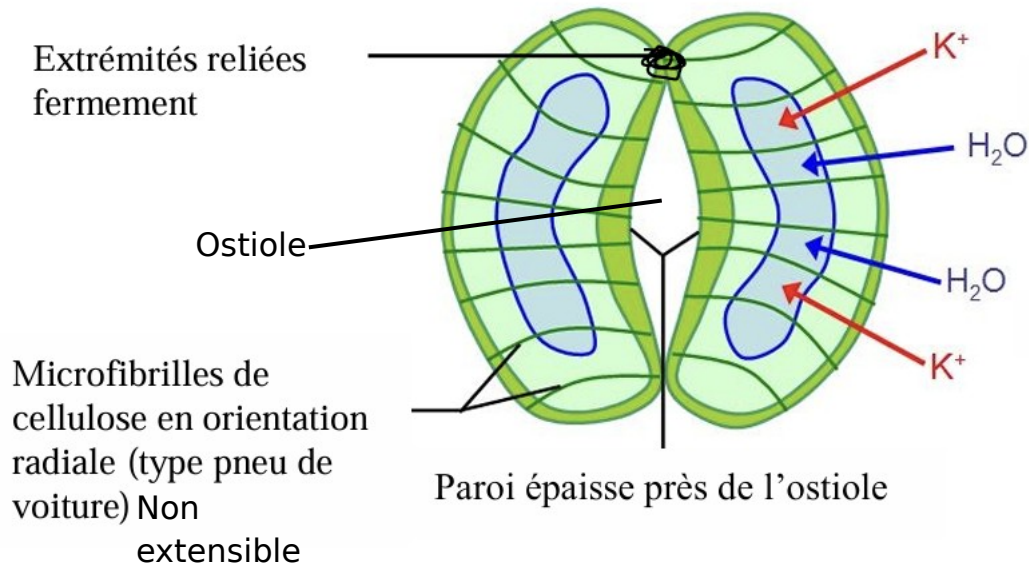
Le jour, les stomates restent **fermés** pour éviter les pertes d'eau.

Grâce à la **photosynthèse**, ce CO₂ est transformé, fixé sous forme de **sucres**.

Mécanisme d'ouverture

- Les **cellules stomatiques** sont les seules à contenir des **chloroplastes** au niveau de l'épiderme.
- Quand il y a de la **lumière**, les stomates s'ouvrent et le **CO₂** se diffuse dans la feuille par les **ostioles**.

- Par la suite, des chloroplastes synthétisent des **sucres** via la **photosynthèse**.
- Les cellules stomatiques pompent aussi activement du **potassium**, ce qui entraîne de l'**osmose** dans ces cellules.



Régul

ation de l'ouverture

La **vacuole** de chaque cellule de garde accumule du **K⁺ (potassium)**, ce qui provoque le phénomène d'**osmose**.

De l'**eau** entre dans les vacuoles, entraînant la **turgescence** du stomate ainsi que son **ouverture**.

La **lumière bleue** stimule des pompes à **protons**, ce qui fait sortir des **H⁺**.

L'intérieur de la vacuole devient **négatif** et le **K⁺** entre pour équilibrer la charge.

Les **solutés** sont plus abondants dans la vacuole et sont dissous avec l'eau.

Cette turgescence permet l'**ouverture** de l'**ostiole**.

Pendant la **nuît**, la photosynthèse ne se déroule pas, et pour éviter une perte d'eau, les stomates doivent se **fermer**.

Pour cela, les cellules deviennent **flasques** en expulsant du potassium, ce qui entraîne la sortie d'eau par **osmose**.

C'est quoi l'ABA acide abscissique ?

C'est une **hormone** produite en réponse à une **carence d'eau** ; elle permet au **stomate de se fermer** et de réduire la **transpiration**.

En résumé

La **lumière** provoque l'entrée de **K⁺**.

Le manque de **CO₂** dans le mésophylle stimule l'**ouverture du stomate**, car quand le dioxyde de carbone (transformé en sucres lors de la photosynthèse) devient rare, la plante comprend qu'il faut en faire entrer plus et ouvre les stomates.

Même sans lumière, la plante continue d'**ouvrir/fermer ses stomates** grâce à une **horloge interne** (rythme circadien) basée sur des gènes programmés pour suivre un cycle d'environ **24h**. Cela dure quelques jours.

Métabolisme

Introduction

Le **métabolisme** correspond à l'ensemble des **réactions biochimiques** d'un organisme.

Les voies **cataboliques** libèrent de l'**énergie** en décomposant des molécules complexes en composés plus simples.

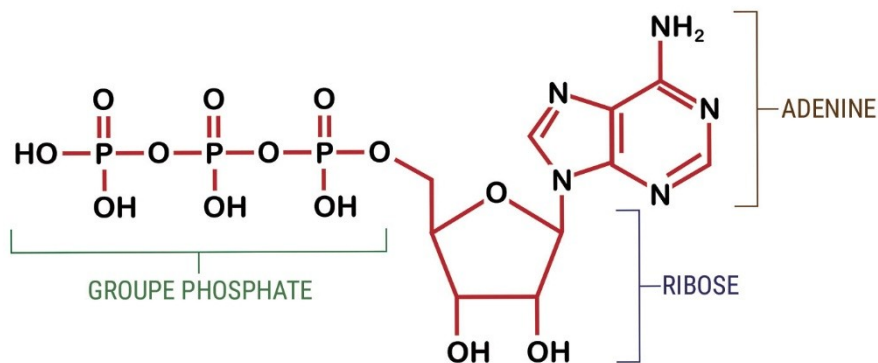
Les voies **anaboliques** consomment de l'**énergie** en élaborant des molécules complexes à partir de molécules plus simples.

Ces deux types de voies sont **reliées** de telle façon que l'**énergie produite** par les voies cataboliques est utilisée par les voies anaboliques.

Energie et ATP

ATP (adénosine triphosphate) est la source d'**énergie directe** pour les cellules.

L'ATP est constituée d'un **groupement de phosphate (3)**, d'un **ribose (sucre)** et d'une **adénine (base azotée)**.



La **liaison de phosphate** peut être rompue par **hydrolyse** et libère donc une molécule de **phosphate inorganique** et de l'**énergie**. L'ATP devient alors de l'**ADP**.

L'énergie libérée lors de l'hydrolyse est immédiatement utilisée par des

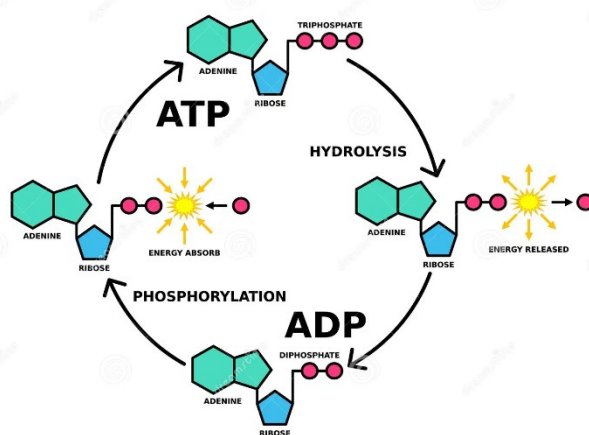
enzymes spécialisées pour **transférer le phosphate inorganique** à une autre molécule qui devient par la suite **active**.
On appelle ce processus la **phosphorylation** (ajout d'un P_i à une molécule).

Que veut dire qu'elle devient active ?

Le **phosphate inorganique** a une **charge électrique négative**.
Lorsqu'il sera attaché à une molécule, cela **modifiera la forme et le comportement** de celle-ci.

Par exemple, chez la **protéine contractile** dans un muscle, en recevant

ATP-ADP CYCLE



le P_i , cela déclenche une **contraction musculaire**.

Ce que peut faire le P_i quand il est transféré :

a. Travail mécanique :

L'ATP effectue la **phosphorylation des protéines motrices**. Cela modifie leur forme → elles bougent. Ensuite, la protéine relâche le phosphate et elle revient à sa forme de base, **l'activation est donc temporaire**.

b. Travail de transport :

L'ATP effectue la **phosphorylation des protéines de transport**. Elle reçoit le P_i , ce qui change sa forme. Cela permet de faire passer un soluté à travers la membrane. Elle relâche ensuite le P_i et la protéine se referme.

c. Travail chimique :

Le phosphate (P_i) se fixe temporairement sur l'**acide glutamique** pour l'**activer**. Cette activation permet à l'acide glutamique de réagir facilement avec l'**ammoniaque (NH_3)**. En réagissant, ils forment la **glutamine**. Ensuite, le phosphate est libéré, car il a effectué son travail. La glutamine formée reste stable après ça.

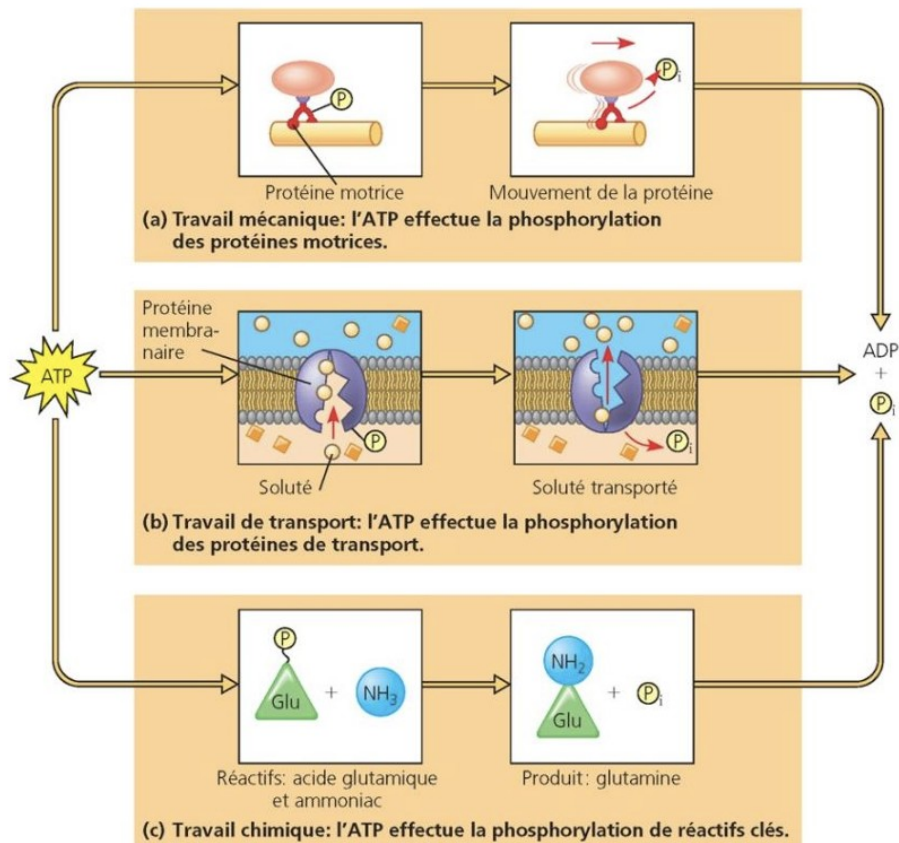
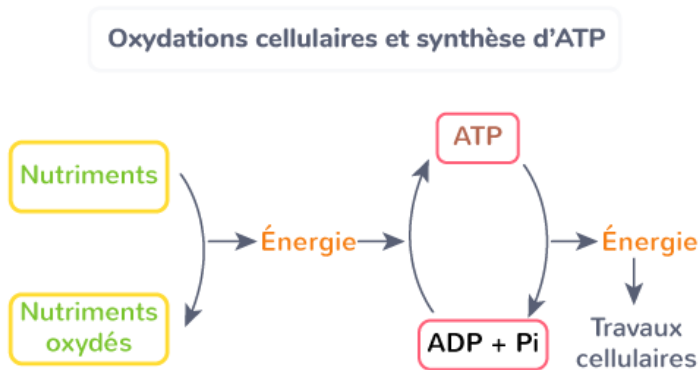


Figure 1 : Rôle de l'ATP dans le travail cellulaire (©2007, Edition du Renouveau Pédagogique Inc.)

Un organisme utilise constamment de l'**ATP**. Celle-ci est régénérée par l'**ajout d'un phosphate à de l'ADP** (phosphorylation). Ce sont les réactions de **dégradation de molécules complexes (catabolisme)** qui

fournissent l'**énergie nécessaire** à ce processus. On appelle cela le **cycle**

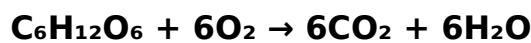


de l'ATP.

Respiration cellulaire

La respiration cellulaire aérobie est la voie **catabolique** la plus répandue ainsi que la plus efficace. Elle libère de l'**énergie** en dégradant des composés organiques en des produits plus simples. La **mitochondrie** est l'organite chez les cellules eucaryotes qui assure ce mécanisme.

L'**oxydation** de sucres par oxygène est une réaction d'**oxydoréduction**. Cette réaction implique la **perte d'électrons** qui est transférée à un autre réactif tandis que le **gain d'électrons** correspond à la réduction.



La réaction d'oxydoréduction qui rapproche les électrons du dioxygène (le **O₂ sert de récepteur à la fin de la chaîne de transport**), telle que la respiration cellulaire, libère de l'**énergie chimique** pouvant servir aux travaux cellulaires. Ce processus contient plusieurs étapes.

Des atomes d'**hydrogène** sont arrachés au glucose. Ils sont accueillis par le **NAD⁺** (enzyme) qui devient alors le **NADH + H⁺**, jouant le rôle de **transporteur d'électrons**.

Glycolyse :

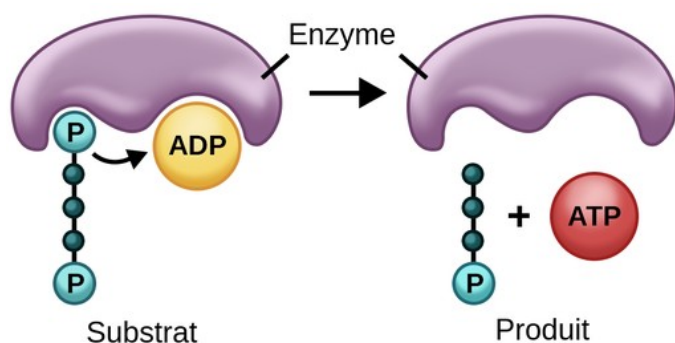
Elle se déroule dans le **cytosol** (liquide du cytoplasme). Durant ce processus, le glucose est dégradé en présence ou non du dioxygène. Grâce au processus des voies cataboliques, le glucose qui contient **6 carbones** se divise en **2 pyruvates de 3 carbones**.

- Glucose = C₆H₁₂O₆
- 2 pyruvates = 2 × C₃H₄O₃ = C₆H₈O₆

On remarque qu'il manque **4 hydrogènes**. Ces 4 hydrogènes ont été captés par des **NAD⁺** qui deviendront **NADH + H⁺**.

La glycolyse donne comme résultat **2 ATP** et **2 NADH + H⁺** par molécule de glucose.

L'ATP est formée grâce à la **phosphorylation au niveau du substrat**.



Cycle de Krebs

Le **cycle de Krebs** a lieu dans la **matrice mitochondriale** et permet de poursuivre la **dégradation du glucose** après la glycolyse. Chaque **pyruvate** entre dans la mitochondrie, perd un **CO₂** et est transformé en **acétyl-CoA** par une enzyme. Cette transformation produit également un **NADH + H⁺**.

Ainsi, avant même que le cycle ne commence, pour **deux pyruvates**, on a déjà libéré **2 CO₂**, formé **2 NADH + H⁺** et obtenu **2 acétyl-CoA**.

Une fois dans le cycle de Krebs, chaque **acétyl-CoA** est complètement dégradé et permet la production de :

- **2 CO₂**
- **3 NADH + H⁺**
- **1 FADH₂**
- **1 ATP** par phosphorylation au niveau du substrat.

Si on additionne l'étape de préparation et le cycle lui-même, le bilan pour **un seul pyruvate** est donc de :

- **3 CO₂**
- **4 NADH + H⁺**
- **1 FADH₂**
- **1 ATP**

Étape	Par 1 pyruvate	Par 1 glucose (2 pyruvates)
Avant le cycle (préparation)	1 CO ₂ , 1 NADH + H ⁺	2 CO ₂ , 2 NADH + H ⁺
Cycle de Krebs	2 CO ₂ , 3 NADH + H ⁺ , 1	4 CO ₂ , 6 NADH + H ⁺ , 2

Étape	Par 1 pyruvate	Par 1 glucose (2 pyruvates)
	FADH ₂ , 1 ATP	FADH ₂ , 2 ATP
Total (prépa + cycle)	3 CO ₂ , 4 NADH + H ⁺ , 1 FADH ₂ , 1 ATP	6 CO ₂ , 8 NADH + H ⁺ , 2 FADH ₂ , 2 ATP

Chaîne respiratoire

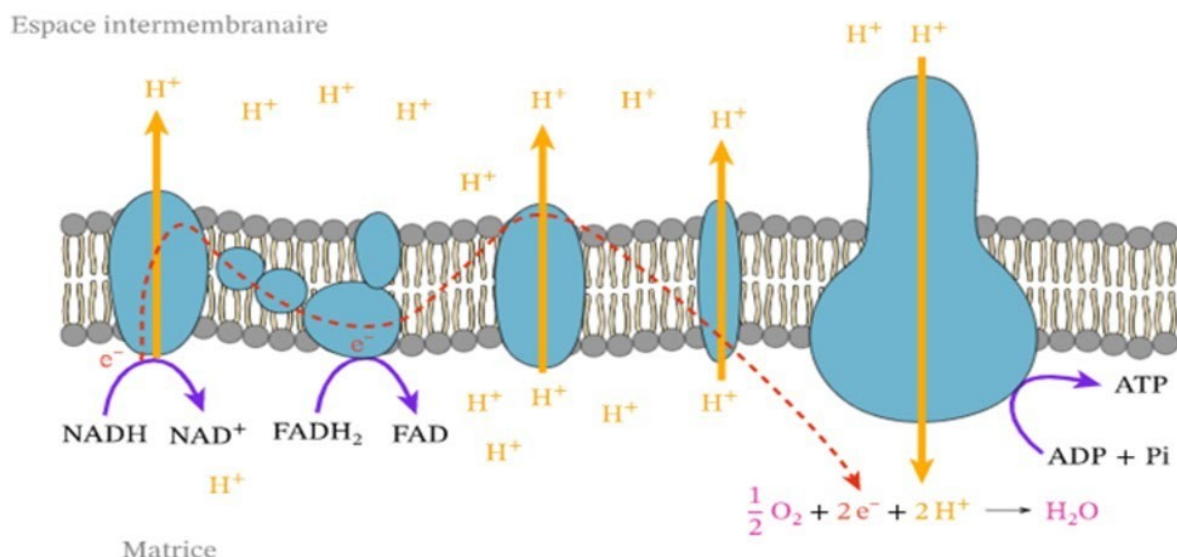
La **chaîne respiratoire** (ou **chaîne de transport des électrons**) est un **ensemble de complexes protéiques** et de molécules insérés dans la **membrane interne de la mitochondrie**. Cette membrane est une **bicouche de phosphoglycérolipides**, dans laquelle sont intégrées des **protéines spécialisées**.

Cette chaîne accepte les **électrons** transportés par le **NADH + H⁺** et le **FADH₂**, provenant des étapes précédentes de la respiration cellulaire : **glycolyse** et **cycle de Krebs**.

Ces électrons sont **transférés de protéine en protéine** le long de la chaîne.

À la fin du processus, ils vont se **combinaison avec des protons (H⁺)** et seront **captés par le dioxygène (O₂)**, qui joue le rôle de **dernier accepteur d'électrons**.

Ils formeront alors de l'**eau (H₂O)**



Phosphorylation oxydative

C'est le principal processus par lequel environ **90% de l'énergie cellulaire** est produite lors de la chaîne respiratoire. Cette chaîne est

composée de **complexes protéiques enchâssés** dans la membrane interne de la mitochondrie.

Lorsque les **électrons (e^-)** issus du **NADH** et du **FADH₂** sont transportés d'une protéine à une autre au sein de cette chaîne, ils libèrent de l'**énergie**. Cette énergie est utilisée pour **pomper activement des protons (H^+)** depuis la matrice mitochondriale vers l'**espace intermembranaire**, créant ainsi un **gradient de protons** — une différence de **concentration** et de **charge électrique**.

Le rôle de l'ATP synthétase

Pour rééquilibrer ce gradient, les protons veulent revenir dans la matrice mitochondriale, mais ils ne peuvent le faire qu'en passant par une enzyme spécifique appelée **ATP synthétase**. Le passage des protons à travers cette enzyme libère une **énergie mécanique** qui est utilisée pour **synthétiser de l'ATP** à partir d'**ADP** et de **phosphate inorganique (Pi)**.

La chimiosmose

C'est une étape clé de la phosphorylation oxydative, où le **gradient de protons (H^+)** est utilisé par l'**ATP synthétase** pour fabriquer l'**ATP**.

La **force proton-motrice** est l'énergie stockée sous forme d'un **gradient de protons**, combinant une différence de **concentration** et de **charge électrique**, qui permet la production d'**ATP** par l'ATP synthétase.

Rendement énergétique du NADH et du FADH₂

Le **NADH + H^+** génère environ **2,5 ATP** lors de la chaîne respiratoire, tandis que le **FADH₂** produit environ **1,5 ATP**.

Cette différence s'explique par le fait que les électrons transportés par le NADH **entrent plus tôt dans la chaîne de transport des électrons**, ce qui permet de pomper un **plus grand nombre de protons** à travers la membrane mitochondriale.

Ce **gradient de protons plus important** entraîne une production plus élevée d'ATP par l'ATP synthétase.

En revanche, les électrons du FADH₂ **entrent plus tard dans la chaîne**, libérant ainsi **moins d'énergie** et générant donc une quantité moindre d'ATP.

Rendement de la respiration cellulaire

La respiration cellulaire produit de l'ATP à partir d'une molécule de glucose, selon deux mécanismes : la phosphorylation au niveau du substrat et la phosphorylation oxydative.

1. Phosphorylation au niveau du substrat

Elle a lieu pendant deux étapes :

- 2 ATP produits lors de la glycolyse
 - 2 ATP (ou GTP) produits dans le cycle de Krebs
- Total : **4 ATP**

2. Phosphorylation oxydative

Elle se déroule dans la chaîne respiratoire grâce à l'oxydation des coenzymes réduits :

- 2 NADH issus de la glycolyse → 5 ATP
 - 8 NADH issus de la décarboxylation du pyruvate et du cycle de Krebs
→ 20 ATP
 - 2 FADH₂ issus du cycle de Krebs → 3 ATP
- Total : **28 ATP**

Bilan total par molécule de glucose

Phosphorylation au niveau du substrat (4 ATP) + phosphorylation oxydative (28 ATP) = **32 ATP**

Autres processus cataboliques associés à la production d'énergie

Quand le **O₂ est absent**, la **phosphorylation oxydative** de la respiration cellulaire aérobie **s'arrête**. Certaines cellules remplacent donc le **O₂ par d'autres molécules** appelées **accepteurs d'électrons**, par exemple le **nitrate, le sulfate ou le carbonate**, à la place de l'oxygène. Cela correspond à une **respiration cellulaire anaérobie**.

La fermentation : alternative sans chaîne respiratoire

D'autres cellules utilisent, dans ce cas, la **fermentation**. Ce processus **n'utilise pas d'O₂** et se dispense d'une chaîne respiratoire. La fermentation est une suite de la **glycolyse**, qui produit **2 ATP** et **2 NADH + H⁺** par glucose.

Rôle du NADH en fermentation

En fermentation, les électrons du **NADH sont donnés au pyruvate** (au lieu d'aller à la chaîne respiratoire), ce qui permet de **régénérer le NAD⁺** et de transformer le pyruvate en un nouveau composé.

Exemples de fermentation

- La **fermentation alcoolique** produit de l'**éthanol**.
- La **fermentation lactique** produit du **lactate**.

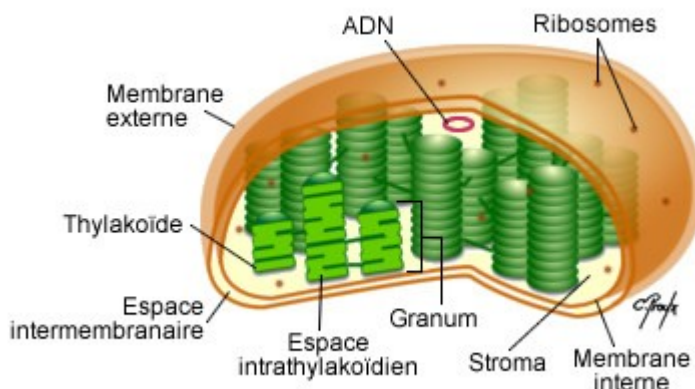
Photosynthèse :

C'est un **processus anabolique** (assemble des **molécules simples** pour former des **molécules plus grosses**) qui utilise la **lumière** comme **source d'énergie** pour **synthétiser de la matière organique**.

Formule :



Elle se déroule chez les **photoautotrophes**, comme les **végétaux**.
Ce sont principalement les **chloroplastes** qui assurent ce mécanisme.



La photosynthèse comprends 2 phases : les réactions photochimiques et le cycle de Calvin.

Réactions photochimiques

Ces réactions se déroulent **dans les thylakoïdes**.

C'est durant ce processus que **l'énergie solaire est transformée en énergie chimique**.

La **chlorophylle** (un **pigment** situé dans les **thylakoïdes**) **absorbe la lumière** et provoque la **photolyse de l'eau** :

le **H₂O** est dégradé en **2 électrons (e⁻)**, **1/2 O₂** et **2 protons (H⁺)**.

Les **protons (H⁺)** et les **électrons (e⁻)** sont transférés à un accepteur final : le **NADP⁺**, qui est ainsi réduit en **NADPH + H⁺**. Parallèlement, de **l'ATP** est produit par l'union de **l'ADP** et d'un **groupement phosphate inorganique (Pi)**, un processus appelé **photophosphorylation**. Ce mécanisme est similaire à celui de la **respiration cellulaire aérobie** dans les mitochondries.

Grâce à la **chimiosmose**, les **protons (H⁺)** se répandent hors de la lumière des **thylakoïdes** en traversant **l'ATP synthétase**. Ce passage

libère de l'**énergie**, utilisée pour former l'**ATP** dans le **stroma**. L'**ATP** et le **NADPH** produits alimentent ensuite la synthèse de **glucides** lors du **cycle de Calvin**.

Cycle de calvin

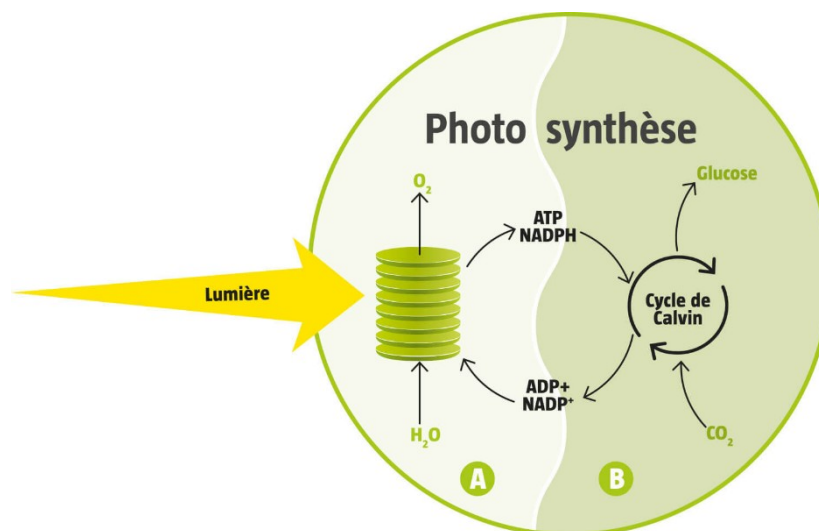
Le **cycle de Calvin** a lieu dans le **stroma** du chloroplaste. Il utilise l'**énergie chimique** (ATP et NADPH + H⁺) produite lors des réactions photochimiques.

Le **CO₂ atmosphérique** entre dans le cycle et est incorporé dans des **molécules organiques** présentes dans le chloroplaste (c'est la **phase de fixation du carbone**).

Ces molécules organiques reçoivent ensuite des **électrons** du **NADPH + H⁺** (provenant de la photolyse de l'eau), ce qui permet leur **réduction** en glucides. Cette étape nécessite également de l'**ATP** produite lors des **réactions photochimiques** pour lier les **électrons** et les **molécules** ensemble.

Pour former une molécule de **glucose** grâce à la **photosynthèse**, le **cycle de Calvin** doit utiliser **6 CO₂**, consommer **18 ATP** et **12 NADPH+H⁺**.

Ce glucose est ensuite transformé en d'autres composés organiques



comme l'**amidon**.

Flux de l'énergie dans les écosystèmes

L'énergie ne se recycle pas dans les écosystèmes. En effet, la **lumière solaire entre dans l'écosystème** et, après avoir été utilisée par les organismes, elle en ressort sous forme de **chaleur** qui se dissipe

dans l'environnement. Ainsi, **l'énergie circule mais ne revient jamais sous sa forme initiale.**

En revanche, **la matière suit un cycle.** Les déchets produits par la **respiration cellulaire**, notamment le **dioxyde de carbone (CO_2)** et l'**eau (H_2O)**, servent de **matières premières pour la photosynthèse**. Cette dernière utilise ces composés pour fabriquer des **molécules organiques**, comme le **glucose**, en présence de lumière. De leur côté, les **organismes hétérotrophes** dépendent de cette matière organique produite par les **photoautotrophes** (plantes, certaines bactéries) pour se nourrir et produire de l'énergie.

Par ailleurs, certaines bactéries dites **chimio autotrophes** sont capables de synthétiser leur propre matière organique à partir de **substances inorganiques**, sans avoir besoin de lumière.

